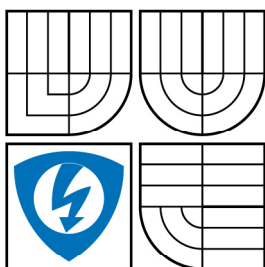


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

GPS NAVIGACE MOBILNÍCH ROBOTŮ

MOBILE ROBOT'S GPS NAVIGATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELORY THESIS

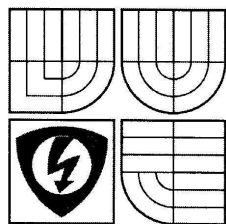
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ZDENĚK TESÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JOLANA DVORSKÁ

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí
techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Tesáček Zdeněk
Ročník: 3

ID: 74602
Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

GPS navigace mobilních robotů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s navigací mobilních robotů pomocí GPS. Vyberte vhodný GPS modul a seznamte se s jeho funkcí. Navrhněte a realizujte mikroprocesorový systém pro GPS navigaci mobilního robotu. Realizujte komunikaci s mikrokontrolérem, zaměřte se na zpracování naměřených dat a jejich použití k řízení mobilního robotu po zadané dráze.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

S.S.Ge, F.L. Lewis - Autonomous Mobile Robots - 2006

Termín zadání: 1.2.2008

Termín odevzdání: 2.6.2008

Vedoucí práce: Ing. Jolana Dvorská

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Bibliografická citace

TESÁČEK, Zdeněk. *GPS navigace mobilních robotů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. s.45, příloh 0. Vedoucí práce Ing. Jolana Dvorská

P r o h l á š e n í

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma "GPS navigace mobilních robotů" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne : 2. června 2008

Podpis:

P o d ě k o v á n í

Děkuji tímto Ing. Jolaně DVORSKÉ za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

V Brně dne : 2. června 2008

Podpis:

1. ÚVOD	8
2. GPS	9
2.1 Historie a budoucnost	9
2.2 Popis funkce	11
2.3 Komunikační protokol NMEA 0183.....	12
2.4 Přesnost GPS.....	16
3. VÝBĚR GPS PŘIJÍMAČE.....	18
3.1 Přehled GPS přijímačů.....	18
3.2 Porovnání parametrů	19
3.3 GPS přijímač Garmin 18 LVC.....	19
3.4 Naměřené údaje a grafy	20
4. KOMUNIKACE S MIKROKONTROLÉREM.....	23
4.1 Mikrokontrolér Atmel AT32Uc3a0512	23
4.2 Vývojová prostředí.....	24
4.2.1 Vývojový kit ATMEL EVK1100	24
4.2.2 Vývojové prostředí IAR Embedded Workbench V2.21B	24
4.3 Komunikační software	25
5. ZPŘESNĚNÍ GPS	29
5.1 Diferenciální GPS	29
5.1.1 Systém EGNOS	29
5.1.2 Systém pozemních diferenciálních GPS CZEPOS.....	30
5.1.3 Vytvoření vlastního systému DGPS	31
5.2 Systém H-STAR	33
5.3 Kalmanův filtr	34
6. POLOHA MOBILNÍHO ROBOTA.....	36
6.1 Určení polohy na zeměkouli	36
6.2 Body v souřadném systému ECEF	37
6.3 Měření v bodech pomocí přijímače GPS	39
6.4 Výstupní data z Kalmanova filtru	40
7. ZÁVĚR.....	43
8. LITERATURA	45

1. ÚVOD

Správná znalost polohy a orientace v prostoru hrála odjakživa důležitou roli a rozhodovala o bytí či nebytí lovce či posádky. Člověk si brzy osvojil orientaci pomocí Slunce či kompasu. Moderní doba přinesla v oblasti lokalizace v prostoru naprosto nové dimenze a to díky rozvoji kosmické techniky a elektroniky. Technologie objevené ve 20. století nám umožnily využití kosmického prostoru kolem zeměkoule pro umístění družicových navigačních systémů, které umožňují určovat polohu kdekoli na Zemi. Jedním z těchto navigačních systémů je GPS NAVSTAR, který využijeme v řešení semestrální práce – k navigaci mobilních robotů.

V semestrální práci se zaměřím na stručnou charakteristiku systému GPS (Global Position System), popis vybraných výstupních vět přijímače GPS, podrobněji prozkoumám možnosti zpřesnění navigace, které budou pro pohybujícího se robota velmi důležitým aspektem. Dále se budu zabývat výběrem vhodného GPS přijímače a jeho otestováním ve statickém režimu. Nakonec popíšu komunikaci přijímače GPS s vybraným mikrokontrolérem. Data zpracovaná mikrokontrolérem budou základní informací o poloze v prostoru pro hlavní řídící logiku mobilního robota. Předpokládám zcela samostatné chování mobilního robota při pohybu v prostoru a čase a jeho automatické rozhodování na základě informací ze senzorů.

2. GPS

Navigační systém GPS určuje polohu v souřadném systému, který je společný pro celou zeměkouli. Systém GPS sestává z vysílačů na oběžné dráze kolem Země a libovolného počtu přijímačů signálů na Zemi. Celý systém pracuje na principu dálkoměrné metody, kdy se měří doba, která uplyne mezi vysláním a příjmem signálu a z této doby lze vypočítat vzdálenost přijímače od družice. Uživatel se pak nachází na průsečíku kulových ploch, jejichž poloměry odpovídají vzdálenostem od viditelných družic.

2.1 HISTORIE A BUDOUCNOST

Vznik satelitních navigačních systémů spadá do 60. let minulého století. Již v roce 1960 byl vyvinut první družicový navigační systém TRANSIT. Sloužil námořnictvu USA k určování polohy vojenských plavidel, což dokázal jedenkrát za hodinu. Provoz zajišťovalo pět družic. O čtyři roky později byl systém uvolněn pro civilní použití. Na podobném principu vybudoval bývalý Sovětský svaz Dopplerovský navigační systém CYKLON, PARUS. Civilní CIKADA je již dožívající. V roce 1967 byla námořnictvem vyvinuta družice TIMOTION, která vynesla do vesmíru přesné hodiny.

Po projektu TRANSIT následovala řada systémů, jedním z nich je i GPS NAVSTAR, později označován pouze jako GPS. Práce na jeho vývoji můžeme rozdělit do třech fází:

První fáze (1973 – 1979)

Fáze označovaná také jako zkušební a testovací. Probíhalo testování funkčnosti, probíhaly konkurzy na dodavatele družic a uživatelských zařízení. První družici vyrobila a dodala firma Rockwell, vypuštěna v únoru 1978. Na oběžnou dráhu byly vypuštěny čtyři pokusné družice a započal vývoj uživatelských zařízení. Do začátku druhé fáze, tedy do roku 1979, se počet družic zvýšil na jedenáct. Jsou označovány také jako družice bloku I.

Druhá fáze (1979 – 1985)

Byla budována řídicí pozemní střediska, současně započala výroba 28 družic druhé generace. Vývoje se opět chopila firma Rockwell.

Třetí fáze (1985 – 1994)

Na orbitu umístěna kompletní sestava 24 družic. V prosinci roku 1993 se začalo využívat trojrozměrné zaměřování.

Za plně operačně způsobilý byl systém prohlášen v roce 1995. Tehdy získal globální celosvětovou podobu s hlavní řídicí stanicí v Colorado Springs v USA.

Civilní složce byl zpřístupněn počátkem 90. let, konkrétně v roce 1983, kdy sovětský stíhací letoun sestřelil v zakázaném sovětském prostoru korejské civilní letadlo KOREAN Air Flight 007. Zahynulo všech 269 lidí na palubě. Na základě této události prohlásil prezident USA Ronald Reagan, že GPS bude po dokončení přístupný i civilnímu použití. Do té doby byl využíván pouze vojensky a provoz systému NAVSTAR spadal výhradně do kompetence amerického ministerstva obrany.

Civilistům umožňoval tento systém přijetí signálu, ale ve zcela přesném určení polohy bránila záměrná systémová chyba SA, která vedla k odchýlení i o několik stovek metrů. V květnu 2000 byla záměrná chyba odstraněna, což umožnilo přijímat civilistům plnohodnotný signál.

V současné době je vývoj systému, přístrojů i aplikací v rukou civilního segmentu, jehož potřeby jej ženou kupředu. Z původně velkých a drahých přístrojů byly vyvinuty přístroje s výbornou přesností, menší a cenově dostupné.

Družice systému GPS fungující téměř 15 let, stárnou. Navíc použité technologie ze 70-tých let minulého století, se dostávají na hranu svých možností díky zvyšujícím se požadavkům na přesnost. Do budoucna se počítá s nahrazením stávajících družic novými, které přinesou podstatné zlepšení přesnosti. Budou disponovat dalšími vysílacími frekvencemi s korekčními daty. Dnes je tento systém jediný, plně funkční a celosvětově použitelný pro široké masy koncových uživatelů.

Pro uživatele je do budoucna velkou nadějí současně se budující navigační systém Galileo, který financují státy Evropské Unie a měl by být zprovozněn do roku 2010.

Koncové přijímače budou kompatibilní se systémem GPS, budou tedy moci využívat služeb obou systémů. Systém Galileo bude přesnější, pro placenou službu se uvádí přesnost až 10 cm, pro bezplatný příjem signálu přesnost do 4 m. Evropský systém bude navíc podporovat obousměrnou komunikaci mezi družicí a přijímačem. Počítá se i s podporou nouzového záchranného systému.

2.2 POPIS FUNKCE

Celý navigační systém GPS je tvořen třemi segmenty:

- kosmický segment
- řídicí segment
- uživatelský segment

Kosmický segment představuje 24 aktivních družic, které jsou rozděleny do šesti oběžných rovin se sklonem 55° od roviny procházející rovníkem. Oběžné roviny družic jsou rovnoměrně odstupňovány po 60° , aby pokryly celou zemskou kouli. Na každé oběžné dráze jsou umístěny čtyři družice, které obíhají ve výšce 20200 km nad zemským povrchem s periodou 11 hodin a 58 minut. Poloha družic na oběžných drahách není pravidelná, ale je optimalizována pro nejlepší pokrytí zemského povrchu. To zajišťuje, že kdekoli na zemské kouli je nejméně pět viditelných družic použitelných pro výpočet polohy. Každá družice nese přesné rubidiové nebo cesiové atomové hodiny. Navigační signály družice jsou vysílány na dvou frekvencích 1575,42 MHz a 1227,6 MHz.

Řídicí segment tvoří hlavní řídicí stanice MCS (Master Control Station) a dalších pět monitorovacích stanic rozmístěných pravidelně kolem rovníku. V hlavní řídicí stanici MCS se shromažďují data z monitorovacích stanic, a ta na základě přijatých dat provádí výpočty parametrů drah družic a synchronizaci atomových hodin.

Uživatelský segment představují koncová zařízení uživatelů, přijímače GPS. Koncová zařízení provádí na základě přijímaného signálu výpočet souřadnic polohy přijímače, grafické zobrazení polohy na mapě nebo navigaci při pohybu v terénu.

2.3 KOMUNIKAČNÍ PROTOKOL NMEA 0183

Koncové uživatelské zařízení prezentované přijímačem signálu GPS má neustále k dispozici soubor nových naměřených a vypočtených dat, který je potřeba organizovat a řadit do smysluplného výstupního formátu k dalšímu zpracování. Uspořádání a vyslání dat zabezpečuje datový protokol NMEA 0183, který byl vyvinut společností National Marine Electronic Association k propojení námořních přístrojů různých výrobců. Tento protokol je velmi obsáhlý, my budeme používat část týkající se GPS. Protokol řadí informace do vět, které mají definovanou strukturu.

Věty protokolu NMEA 0183

Výstup dat z GPS přijímače je řešen jako sériový přenos vět. Každá věta začíná znakem \$ (dolar) a končí dvěma znaky <CR> a <LF>. Jsou povoleny pouze tisknutelné znaky ASCII, jednotlivé hodnoty uvnitř věty jsou odděleny čárkou. Každá věta začíná identifikátorem, který určuje typ zprávy.

Protože výstupních vět existuje celá řada, uvedu vybrané věty nutné k určení polohy, výšky, času, rychlosti a odhadu chyby [1].

\$GPRMC – doporučené minimum přenášených dat

\$GPRMC,193430,A,4905.7599,N,01621.6684,E,000.0,353.2,131207,002.7,E,A*11

1	193430	čas UTC
2	A	stav, A – platná pozice, V – pozice neplatná
3	4905.7599	zeměpisná šířka
4	N	indikátor sever/jih
5	01621.6684	zeměpisná délka
6	E	indikátor východ/západ
7	000.0	rychlost nad zemí (v uzlech)
8	353.2	azimut pohybu (ve stupních)
9	131207	datum UTC
10	002.7	hodnota magnetické odchylky (ve stupních)
11	E	směr magnetické odchylky východ/západ
12	*11	kontrolní součet

Obsahuje základní informace o pohybu v prostoru a o čase, z kterých můžeme smysluplně zobrazit aktuální polohu na mapě, směr pohybu a přesný čas.

\$GPGSA – ukazatel geometrie rozložení družic pro výpočet polohy

\$GPGSA,A,3,01,,,11,,,20,23,,31,,5.9,3.5,4.8*34

1	A	mód, A – automatický, M – manuální
2	3	typ navigace, 0 – není možná, 2 – 2D, 3 – 3D navigace
3	01 – 31	identifikátory družic (rozsah 01-32) pro výpočet polohy
4	5.9	DOP(Dilution of Position) ukazatel geometrie rozložení družic
5	3.5	HDOP – horizontální složka DOP
6	4.8	VDOP - vertikální složka DOP
7	*34	kontrolní součet

\$GPGSV – viditelné družice na obloze

\$GPGSV,3,1,12,01,23,048,41,04,17,310,00,05,00,008,00,11,45,169,47*70

1	3	celkový počet přenášených GSV vět
2	1	pořadové číslo právě přenášené zprávy
3	12	celkový počet viditelných satelitů
4	01	označení družice
5	23	elevační úhel udávající výšku družice nad obzorem
6	048	azimut polohy satelitu
7	41	síla signálu
8	04	označení další družice
9	17	elevační úhel udávající výšku další družice nad obzorem
10	310	azimut polohy dalšího satelitu
11	00	síla signálu další družice

dál se zpráva opakuje pro další satelity

Věty \$GPGSA a \$GPGSV obsahují podrobné informace o aktuálních polohách družic, ze kterých se provádí výpočet polohy přijímače. Důležitý parametr DOP (Dilution of Precision) udává, jak vhodné je aktuální rozmístění družic pro výpočet polohy. Dále máme z každé družice k dispozici údaje o jejím elevačním úhlu, azimutu a síle signálu.

\$GPGGA – informace o naměřené poloze a výšce

\$GPGGA,193430,4905.7599,N,01621.6684,E,1,05,3.5,217.0,M,43.8,M,,*44

1	193430	čas UTC
2	4905.7599	zeměpisná šířka
3	N	indikátor sever/jih
4	01621.6684	zeměpisná délka
5	E	indikátor východ/západ
6	1	kvalita GPS signálu, 0 – bez signálu, 1 – bez DGPS
7	05	počet družic použité k výpočtu polohy
8	3.5	HDOP – horizontální složka ukazatele geometrie družic
9	217.0	výška antény vztažená k hladině moře
10	M	jednotka předchozího údaje
11	43.8	výška antény vztažená ke geoidu
12	M	jednotka předchozího údaje
13	„	stáří poslední korekce DGPS, prázdné – není DGPS
14	*44	kontrolní součet

Věta v sobě nese navíc informaci o výšce a o přesnosti vypočítaných souřadnic, která je případně doplněna údaji o přítomnosti signálu z diferenciatní družice. Zpřesňující signál z diferenciatní družice DGPS má podstatný vliv na výslednou přesnost souřadnic! S použitím signálu DGPS se chyba výpočtu souřadnic pohybuje od 1,5 m do 2,5 m, což je velmi dobrý výsledek.

\$PGRME – proprietární věta odhadu chyby polohy

$\$PGRME, 8.7, M, 11.8, M, 14.7, M * 2B$

1	8.7	odhad chyby horizontální polohy
2	M	jednotka přechozího údaje
3	11.8	odhad chyby vertikální polohy
4	M	jednotka přechozího údaje
6	14.7	odhad celkové chyby v prostoru
7	M	jednotka předchozího údaje
8	*2B	kontrolní součet

Věta prezentuje údaje výpočtu odhadu chyby pomocí vnitřního firmware firmy Garmin.

2.4 PŘESNOST GPS

I po zrušení záměrné systémové chyby SA v navigačním systému GPS, kdy se chyba určení polohy pohybovala okolo stovek metrů, je přesnost systému zatížena několika fyzikálními a technickými faktory:

- **Ionosférická refrakce**

Při průchodu signálu ionosférou, dochází k ionosférické refrakci, tzn. ohybu signálu, který se dostává k uživateli delší cestou, než je jeho skutečná vzdálenost od družice. Pro potlačení této chyby se využívá toho, že každá družice vysílá signál na dvou různých frekvencích. Zpracováním těchto dvou signálů, které mají různé vlastnosti při průchodu ionosférou, lze odhadnout vliv ionosféry na zpoždění signálu a tím zpřesnit určení polohy.

- Šum a rozlišovací schopnost GPS přijímače
- Nepřesné určení oběžných drah (efemerid) navigačních družic
- Nestabilita a tím jistá nepřesnost atomových hodin systému
- Troposférická refrakce
- Vícecestné šíření signálu

Důležitým faktorem spolehlivého určení přesné polohy jsou podmínky příjmu signálu na straně přijímače. Zde se projevují dynamické vlivy, které nelze dopředu nikdy odhadnout. Jedná se o okamžitý výhled na družice a aktuální rozmístění družic. Pro určení polohy v rovině musí mít přijímač GPS k dispozici signál minimálně ze tří družic. Aby byl schopen určit i výšku, viditelné družice musí být minimálně čtyři. I když je splněna podmínka počtu viditelných družic, není přesnost určení pozice nikdy stejná. Rozhoduje aktuální rozmístění družic na nebi. A tento parametr se v čase mění podle toho, jak se družice pohybují po oběžných dráhách. Čím více jsou od sebe viditelné družice navzájem vzdáleny, tím přesnější bude výpočet pozice přijímače. Průsečík těchto kulových ploch s poloměrem vzdálenosti přijímače od družic je plošně malý.

Přijímač GPS tedy neustále vyhodnocuje elevační úhel, azimut a sílu signálu viditelných družic, a na jejich základě vypočítává činitel zhoršení přesnosti PDOP (Position Dilution of Precision). Činitel PDOP odpovídá velikosti plochy průsečíku kulových ploch vzdáleností od jednotlivých viditelných družic. Pokud jsou tedy družice na nebi rozmístěny rovnoměrně, činitel PDOP je nízký a chyba určení polohy je nízká. Jestliže se družice k sobě přibližují, PDOP roste a chyba měření polohy přijímače se zvětšuje.

3. VÝBĚR GPS PŘIJÍMAČE

Pro senzory a čidla, které jsou určeny pro konstrukci mobilního robota, jsou důležitými parametry především vynikající požadované charakteristiky, malá hmotnost a pokud možno co nejmenší spotřeba. Těmito požadavky se budeme řídit i při výběru přijímače GPS jako vstupního senzoru při řízení mobilního robota.

3.1 PŘEHLED GPS PŘIJÍMAČŮ

V současné době, kdy došlo k masovému rozšíření a používání navigačních přístrojů, existuje bohatá nabídka uživatelských zařízení v podobě samostatných modulů GPS s komunikací po sériové lince, integrovaných GPS přijímačů v zařízeních PDA nebo mobilních telefonech, navigačních přístrojů s grafickým výstupem včetně map, a nebo jednoúčelových kapesních přijímačů GPS. Výrobci těchto koncových zařízení využívají několik typů čipových sad pro zpracování GPS signálu.

Přehled nejznámějších GPS čipových sad seřazených podle provozní citlivosti:

čipová sada	provozní citlivost
SirfStar III	-159 dBm
MTK	-158 dBm
SONY CXD2951GA-2	-152 dBm
Nemerix NJ-1030	-147 dBm
SirfStar IIe	-142 dBm
Garmin	-135 dBm

3.2 POROVNÁNÍ PARAMETRŮ

Abychom získali co nejpresnější údaje o poloze a zároveň mohli přijímat signál i za zhoršených podmínek, je nejdůležitějším parametrem při výběru přijímače GPS jeho vstupní citlivost. Provedení přijímacích antén je u většiny přijímačů téměř shodné, takže je možno je zanedbat. Nejlepší provozní citlivost má chip SirfStar III. Dá se tedy předpokládat, že i za zhoršených podmínek v městské zástavbě mezi vysokými domy nebo v lesním porostu, bude přijímač schopen spolehlivě určit svoji polohu. Pro porovnání, je 50 krát citlivější než jeho předchůdce SirfStar IIe.

3.3 GPS PŘIJÍMAČ GARMIN 18 LVC

Pro prvotní pokusy a zkušební provoz jsem zvolil model Garmin 18 LVC [4]. Tento typ by sice neuspěl za zhoršených podmínek při příjmu signálu GPS, ale splňuje základní požadavky implementace do mobilního robota.

Vyhovuje pro potřebu mobilního robota z důvodů:

- Datová komunikace probíhá po sériové lince standardu RS-232
- Podpora DGPS systému WAAS/EGNOS
- Mechanická odolnost

GPS přijímač Garmin 18 LVC

- 12 paralelních kanálů
- Rychlost – jedno měření za vteřinu
- Podpora WAAS/EGNOS
- Teplý start 15 s
- Studený start 45 s
- Napájecí napětí 4,0 – 5,5V, při 5 V spotřeba 60 mA



Obr.1: Přijímač Garmin 18 LVC

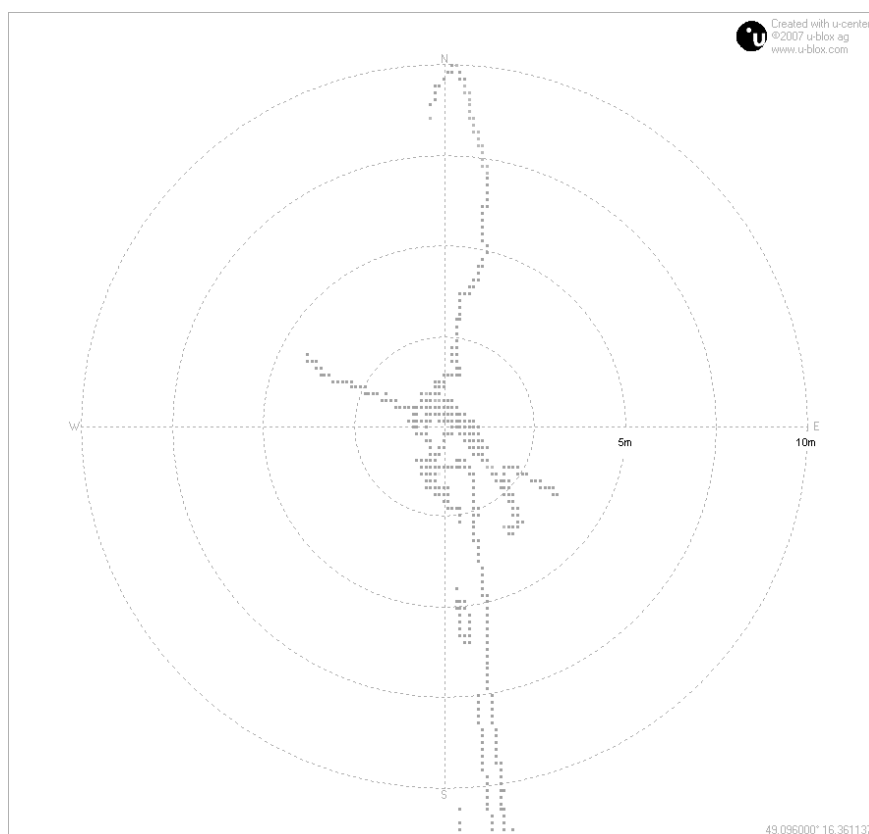
3.4 NAMĚŘENÉ ÚDAJE A GRAFY

Abych získal představu o přesnosti systému GPS, rozhodl jsem se, že provedu dlouhodobé měření polohy pomocí přijímače Garmin 18 LVC, který byl umístěn na jednom místě a nebylo s ním nijak manipulováno. Záznam dat probíhal po dobu 12 hodin, a jak se ukázalo, objem dat byl tak velký, že jsem byl nakonec nucen zvolit připojení přijímače ke stolnímu PC a použít komfortní ovládací software z prostředí Windows. Zpracování a uložení dat pomocí mikrokontroléru by obnášelo značné programátorské úsilí s nejistým výsledkem. Pro záznam výstupních informací z přijímače GPS mi nejlépe vyhovoval program U-Center 5.0 švýcarské firmy U-Blox [5].

Tento program má přehledné a srozumitelné grafické výstupy se širokými možnostmi voleb, dokáže informace z přijímače GPS zaznamenávat a umožňuje vkládat další parametry přijímaných dat, čímž se dají simulovat různá omezení a chyby při skutečném provozu.

Aby podmínky příjmu signálu nebyly úplně dokonalé, umístil jsem přijímač GPS pod sklo šikmého střešního okna. Výhled byl na severní a západní stranu částečně stížen. Naopak výhled na jižní a východní stranu omezen nebyl. V této stabilní poloze probíhal záznam dat od 9:00 do 21:00 hod. Zaznamenávaly se všechny věty, které byly z GPS přijímače k dispozici s periodou 1 s. Tímto vznikl textový soubor o velikosti přibližně 32 MB.

Výstupem je grafické zobrazení chyby výpočtu polohy v horizontální rovině po dobu 12 hodin, kdy byl přijímač GPS v pevné neměnné poloze. Vertikální chybu měření výšky neuvažují. Jak velké bylo průběžné odchýlení souřadnic od pravděpodobné polohy přijímače je na (obr.2) a rozmístění družic na nebi po skončení měření (obr.3).



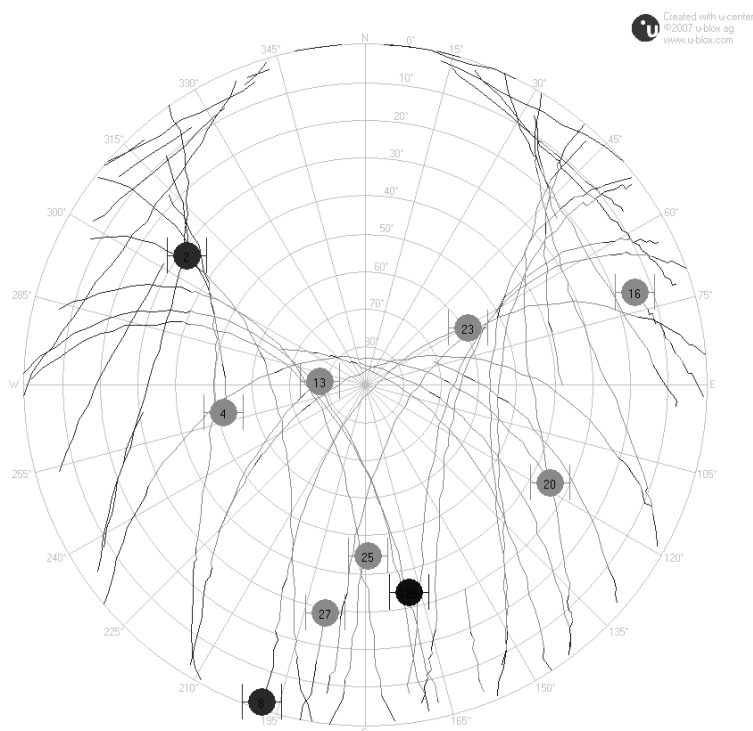
Obr.2: Grafické zobrazení chyby měření

Na (obr.2) je nejpravděpodobnější poloha přijímače GPS vynesena do středu grafu. Soustředné kružnice jsou ve vzdálenosti po 2,5 m od nejpravděpodobnější polohy přijímače GPS. Z (obr.2) se dá říci, že většina chyb určení polohy byla ohraničena vzdáleností právě 2,5 m. Což odpovídá i hodnotám odhadu chyb HDOP (Horizontal Dilution of Position) během měření.

V 12-ti hodinovém měření se ovšem vyskytlo několik větších nepřesností. Menší nepřesnosti do vzdálenosti 5 m jsou způsobeny ztrátou signálu z družice DGPS. Je třeba uvést, že po celou dobu měření, byl k dispozici signál minimálně z jedné

diferenciální družice systému WAAS/EGNOS. Průběžně byly dostupné signály z družic č.124 a č.126, které se nacházely nízko nad obzorem, jižním směrem.

V průběhu měření se vyskytla jedna velká nepřesnost určení pozice, která dosahovala velikosti 79 m. Na (obr.2) je zobrazena jižním směrem a z důvodů zvoleného měřítka není viditelná úplně.



Obr.3: Trajektorie a rozložení družic na obloze

Po ukončení měření a záznamu dat z přijímače GPS, byl signál k dispozici celkem ze sedmi družic, na (obr.3) jsou to světle šedé body s čísly 4, 13, 23, 16, 20, 25 a 27. Tmavý bod mezi družicemi č.25 a č.27 je diferenciální družice systému EGNOS č.126. Další dva tmavé body jsou družice, které nebyly pro výpočet polohy použitelné.

4. KOMUNIKACE S MIKROKONTROLÉREM

Pro řízení mobilních robotů je nejdůležitějším parametrem řídící elektroniky spotřeba energie. U automatických robotů, které používají energii z baterií i k pohybu, jsou energetické zdroje velmi omezené. Proto jsem kladl při výběru mikrokontroléru důraz právě na spotřebu a na velký výpočetní výkon. Při podrobném prozkoumání parametrů mikrokontrolérů od různých výrobců, jsem se přiklonil k letošní novince firmy ATMEL procesoru s jádrem UC3, typu AT32UC30512 [2]. Pro tento mikrokontrolér jsou k dispozici zdarma softwarová vývojová prostředí AVR32 Studio a IAR Embedded Workbench [3] omezené velikostí kódu 32kB. K dispozici je i real-time kernel FreeRTOS [6]. Firma ATMEL pro tento typ mikrokontroléru dodává hardwarový vývojový kit EVK1100 [2], který se výborně hodí pro počáteční seznámení a vývoj aplikací pro robota.

4.1 MIKROKONTROLÉR ATMEL AT32UC3A0512

- 32-bitový Flash mikrokontrolér, jádro AVR32 UC pro low-power aplikace
- jednocyklový RISC instrukční soubor rozšířený o DSP instrukce
- 15 periferních DMA kanálů pro urychlení komunikace
- 512kB Flash paměť
- 64kB SRAM paměť
- externí SRAM/SDRAM sběrnice (24 bitů adresových a 16 bitů datových)
- řadič přerušení a programovatelnou prioritou
- interní oscilátor 32kHz, PLL, Watchdog časovač, real-time clock časovač
- rozhraní USB 2.0 full-speed (12Mbps)
- rozhraní Ethernet MAC 10/100
- tříkanálový 16 bitový čítač/časovač
- sedmikanálový 16 bitový PWM řadič
- čtyři USART rozhraní
- dva Master/Slave SPI
- jeden I²C
- jeden TWI 400kbit/s
- osmikanálový 10-bitový A/D převodník
- JTAG debug interface
- napájecí napětí 3.3V

Spotřeba mikrokontroléru se uvádí při napětí 3.3V a taktu 66MHz, max. 40mA.

4.2 VÝVOJOVÁ PROSTŘEDÍ

4.2.1 Vývojový kit ATMEL EVK1100

Vývojový kit EVK1100 je osazen mikrokontrolérem AT32UC3A0512, dále obsahuje rozhraní Ethernet 10/100 konektor RJ-45, rozhraní USB 2.0 konektor mini USB, senzory osvětlení a teploty, LCD displej 20x4 znaků, dva sériové porty, konektory JTAG, SPI, TWI, slot pro SD/MMC kartu a několik tlačítek a LED diod.



Obr.4: Vývojový kit EVK1100

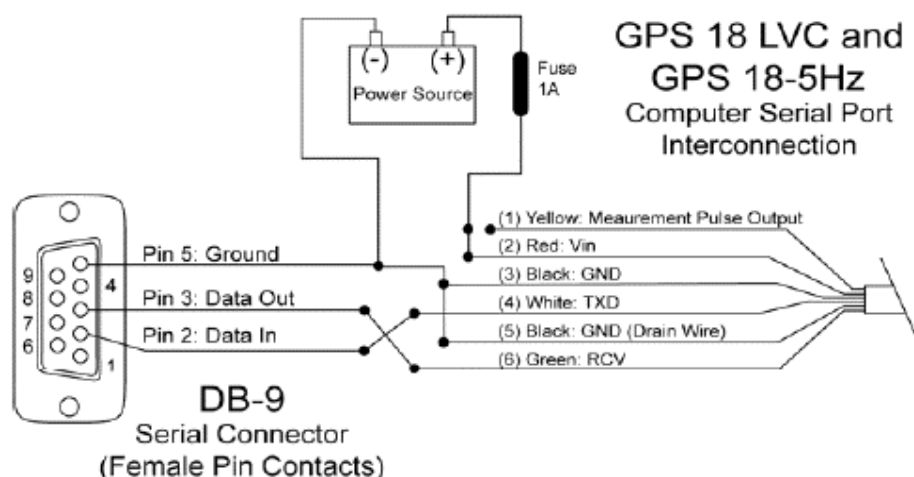
4.2.2 Vývojové prostředí IAR Embedded Workbench V2.21B

Pro skupinu procesorů AVR32 jsou zdarma k dispozici dvě integrovaná vývojová prostředí, a to AVR32 Studio a IAR Embedded Workbench. AVR32 Studio vychází z GNU C kompilátoru pod operačním systémem Linux a jeho funkce a možnosti jsou podstatně rozšířeny a je zdarma. IAR Embedded Workbench je produktem světoznámé firmy IAR, která se zaměřuje na tvorbu kompilátorů C/C++ pro nepřeberné množství mikrokontrolérů různých výrobců, a to od 8 bitových až 32 bitové (ARM architektury, Intel, NEC, ST). Oba produkty jsem si vyzkoušel a více mně vyhovoval produkt od firmy IAR pro svou jednoduchost, rychlost, bezproblémovou komunikaci s programátorem a také výslednou efektivnost. Plná verze tohoto produktu je placená, firma IAR však nabízí plnohodnotnou funkční

verzi IAR Embedded Workbench KickStart, která je omezena jen velikostí výsledného kódu 32kB.

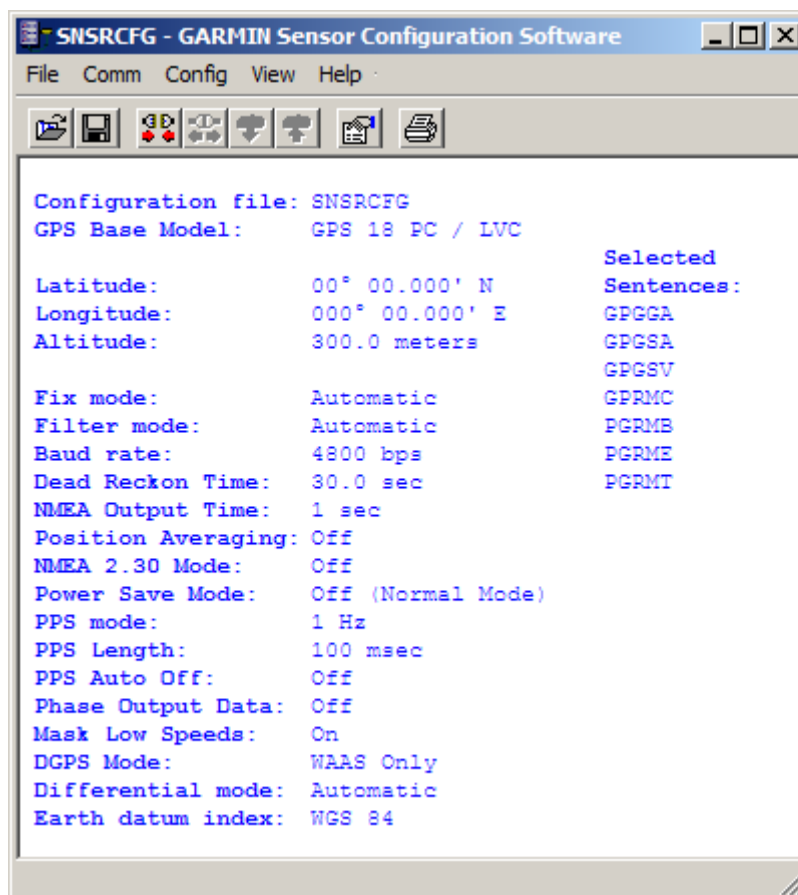
4.3 KOMUNIKAČNÍ SOFTWARE

Jedním ze základních úkolů semestrální práce je vyčtení dat z přijímače GPS pro další zpracování. Jak již bylo řečeno, komunikace s přijímačem GPS probíhá po standardním sériovém protokolu RS-232. Hardwarově je to vyřešeno připojením datových vodičů TXD, RXD GPS přijímače k sériovému rozhraní USART0 vývojové desky EVK1100. Pro funkčnost sériového rozhraní USART mikrokontroléru AT32UC3A0512 je nutná jeho definice, inicializace a nakonfigurování. Mikrokontrolér AT32UC3A0512 umožňuje přiřadit k vnitřnímu funkčnímu bloku příslušný pin pouzdra. Pro sériovou komunikaci spojíme odpovídající vstupní a výstupní pin s vnitřním řadičem obvodu USART. Po tomto fyzickém propojení je třeba zařízení inicializovat s využitím dodaných knihoven z balíku Software FrameWork 1.1.1 pro sériový port. Po úspěšné inicializaci provedeme nastavení parametrů konfigurace sériové linky. Nastavíme přenosovou rychlost na 38400 baudů, počet bitů v přenášeném bajtu na osm, paritní bit zůstane nevyužit.



Obr.5: Schéma zapojení přijímače Garmin 18 LVC k sériovému portu USART0

Pro konfiguraci a nastavení parametrů GPS přijímačů Garmin slouží utilita SNSRCFG_320 (obr.6) [4]. Přes jednoduché prostředí lze elegantně nastavit typy výstupních zpráv, DGPS a statickou navigaci.



Obr.6: Konfigurační software Garmin

Provedl jsem následující nastavení:

- Vypnutí statické navigace
- Použití zpřesňujících signálů DGPS systému WAAS/EGNOS
- Výběr typů výstupních vět – GPRMC, GPGLA, PGRME

Většina přijímačů GPS má standardně aktivovanou statickou navigaci. Přijímač do rychlosti cca 4 km/h to nepovažuje za pohyb a zafixuje svoji polohu. Toto je výhodné např. u navigací v automobilech, kdy zastavení automobilu není provázáno

nežádoucím malým signalizovaným pohybem. Pro účely řízení robota je ovšem tato vlastnost nepřijatelná.

Možnost příjmu korekčního signálu z diferenciálních družic DGPS systému WAAS/EGNOS má velmi podstatný vliv na přesnost určení polohy!

Standardní věty GPRMC a GPGGA poskytují všechny dostačující informace pro určení polohy mobilního robota v prostoru a čase. Avšak přijímač Garmin 18 LVC dále poskytuje vlastní výpočet odhadu chyby pozice, který prezentuje proprietární věta PGRME. Tyto informace budeme též dále zpracovávat.

Komunikační program je napsán v jazyce ANSI C s využitím prostředí IAR. Program zajišťuje kompletní obsluhu přijímaných dat z přijímače GPS. Tento program bude implementován do hlavního řídicího algoritmu pohybu robota. Programové bloky dalších senzorů a ovládacích součástí bude hlavní řídicí logika obsluhovat na základě systému přerušení, nebo je zde možnost provozování real-time systému FreeRTOS. Osobně bych se přiklonil k řešení postaveném na real-time systému.

Po úspěšné inicializaci a konfiguraci všech potřebných vnitřních registrů a zařízení je procesor připraven k příjmu dat z přijímače GPS. Algoritmus spolehlivého načtení dat ze sériového portu počítá s výpadkem či havárií modulu přijímače GPS. Program tedy i po odpojení přijímače GPS za chodu nezpůsobí krach nebo zacyklování, ale informuje hlavní řídicí logiku o nedostupnosti platných vstupních dat.

Data z přijímače GPS jsou ukládána do vstupního bufferu a jsou k dispozici každou sekundu. Po kritické části správného načtení dat do bufferu se data přiřadí do řetězců odpovídající názvům vět. Znakové řetězce GPRMC, GPGGA a PGRME tedy obsahují aktuální platná data.

V dalším kroku je nad každou větou spuštěn selektivní algoritmus, který přiřadí jednotlivé údaje odpovídajícím výstupním proměnným nebo řetězcům. Na výstupu tedy můžeme očekávat např. v řetězci *gps_rychlost* odpovídající naměřenou aktuální hodnotu.

Některé vstupní hodnoty jsou již v konečném tvaru a není nutné je dále zpracovávat. Budou dostupné přímo pro hlavní rozhodovací logiku robota. Ostatní

data musí být dále vyhodnocena podle požadavků a teprve potom předána řídicímu systému robota.

Přijátá data z přijímače GPS jsou prozatím zobrazována na znakovém LCD displeji s periodou 1 s (obr.7).



Obr.7: Zobrazení přijímaných dat z přijímače GPS

Popis výstupních dat z přijímače GPS Garmin 18 LVC

- 04 počet použitých družic k výpočtu polohy
- 1 0 – neplatná data, 1 – platná 3D data, 2 – platná DGPS data
- 09:27:55 čas UTC
- 0000.0 rychlost v km/h
- 204.3 výška v metrech
- 353.2 azimut pohybu ve stupních
- 14.1 odhad horizontální chyby v metrech věty PGRME
- 11.2 odhad vertikální chyby v metrech věty PGRME
- 18.0 odhad celkové chyby 3D v metrech věty PGRME
- 28C teplota senzoru ve °C
- 4905.7608 zeměpisná šířka N 49°05.7608‘
- 1621.6619 zeměpisná délka E 16°21.6619‘

5. ZPŘESNĚNÍ GPS

V naší aplikaci bude získání co nejpřesnější polohy mobilního robotu pomocí GPS prioritní. Pro zlepšení přesnosti určení pozice existuje několik systémů a obecných metod, které jsou uvedeny níže.

5.1 DIFERENCIÁLNÍ GPS

5.1.1 Systém EGNOS

Tento systém pokrývá oblast Evropy. Je tvořen asi třiceti pozemními monitorovacími stanicemi, které jsou rovnoměrně rozmístěny po celé Evropě. Každá stanice monitoruje signál ze všech viditelných družic GPS a naměřená data se okamžitě předávají do řídicího centra. Zde jsou data zpracovávána a výsledkem jsou pak informace o stavu GPS družic a především o chybách měření. Tyto data jsou pak předána satelitům umístěným na geostacionárních oběžných drahách. Jde o satelity komunikačního systému INMARSAT. Pro Evropu jsou použitelné dva, Inmarsat III a ESA Artemis. Tyto satelity směrují vyhodnocená data o chybách měření zpět na Zemi k uživatelským přijímačům GPS. Aby byl přijímač GPS schopen tyto korekční údaje přijmout, musí podporovat systém WAAS/EGNOS. Systém WAAS je shodný se systémem EGNOS a pokrývá oblast Spojených států. Na světě existují další systémy DGPS, které jsou kompatibilní se systémem WAAS/EGNOS a jsou dány oblastí příjmu. Systém CWAAS pokrývá Kanadu, GAGAN Indii, SNAS Čínu a systém MSAS Japonsko.

Systém EGNOS výrazně zlepšuje přesnost měření polohy GPS přijímače. Chyba určení polohy by měla být v 95% měření menší než 1,5 metru. V porovnání s určením polohy přijímače GPS bez signálu z diferenciální GPS, je rozdíl výrazný a dosahuje téměř jednoho řádu. Bohužel, není zaručena stoprocentní dostupnost signálu systému EGNOS, což je dáno především podmínkami příjmu signálu. Poněvadž jsou satelity umístěny na geostacionární drahách na rovníku, jsou z našeho pohledu střeoevropana hodně nízko nad obzorem jižním směrem. Je jasné,

že v praxi nelze vždy splnit podmínku dobrého výhledu na jih, čímž přicházíme o možnost příjmu korekčních dat, které jsou pro naše měření a určení nejpřesnější polohy významné.

5.1.2 Systém pozemních diferenciálních GPS CZEPOS

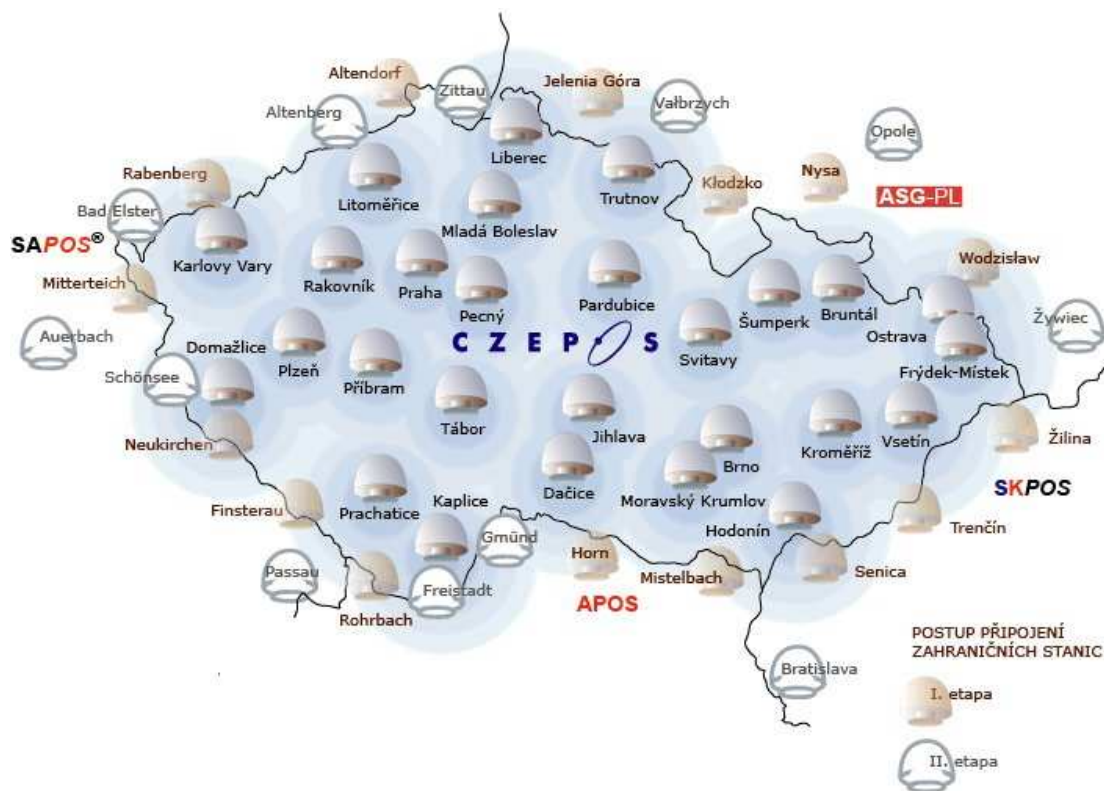
Systém CZEPOS [8] je síť permanentních stanic pro určování polohy, který provozuje Zeměměřičský ústav (obr.8). Poskytuje uživatelům GPS korekční data v reálném čase na území České republiky. Služby jsou rozděleny do skupin podle použití a požadované přesnosti, a jsou zpoplatněny.

Systém nabízí několik typů požadovaných přesností měření. Můžeme získat polohu s přesností do 10 centimetrů, centimetrovou přesnost či milimetrovou přesnost. Pro smysluplné využití této služby při navigaci mobilního robota, by dostačovala přesnost měření do 10 centimetrů. Postačuje tedy levnější přijímač GPS, který umožňuje přijímat a zpracovávat DGPS korekční data v reálném čase a pro příjem DGPS korekcí ze stanice CZEPOS mobilní internetové připojení GPRS. Korekční data jsou pak přijímána přes standardní protokol NTRIP z internetového serveru CZEPOS a jsou k dispozici přibližně za 20 až 40 sekund od vyžádání.

Nalezení polohy s centimetrovou přesností vyžaduje použití GPS přijímače, který je schopný přijímat a zpracovávat RTK (Real Time Kinematics) korekce. Korekční data jsou pak opět k dispozici přes mobilní internetové připojení GPRS. Dále je nutné, aby byl GPS přijímač dostatečně blízko stanice CZEPOS (do několika desítek kilometrů), jinak se výrazně snižuje přesnost určení polohy. Pokud tuto podmínku vzdálenosti přijímač nesplňuje, vytvoří se pseudoreferenční stanice, která je vzdálena přibližně pět kilometrů od přijímače. Korekční data této virtuální stanice jsou pak systémem vygenerována na základě síťového řešení ze všech stanic systému CZEPOS.

Centimetrová až milimetrová přesnost polohy funguje na principu postprocessingu. Přesná data jsou vypočtena až po skončení měření, a to se značnou

prodlevou a proto je využití těchto informací pro navigaci mobilního robota bezpředmětné.



Obr.8: Mapa rozmístění pozemních stanic systému CZEPOS

Využití systému CZEPOS by mělo smysl, kdyby byl mobilní robot vybaven některým způsobem připojení do internetu. Cena DGPS korekčních dat získaných z internetového serveru je zpoplatněna dvaceti korunami za jednu hodinu stahovaných dat.

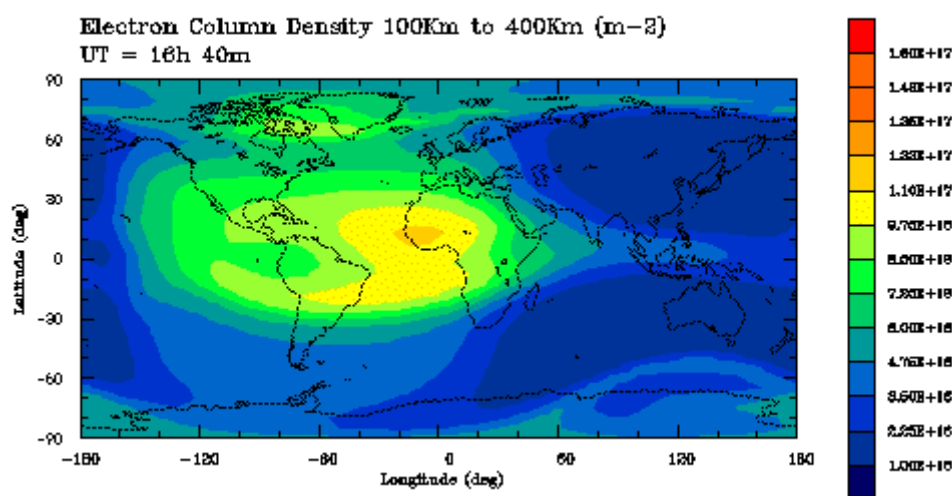
5.1.3 Vytvoření vlastního systému DGPS

Princip získání přesnější informace o poloze přijímače GPS je stejný jako u systému EGNOS. Avšak s tím rozdílem, že pozemní monitorovací stanici nám nahradí běžný GPS přijímač. Tento přijímač umístíme na souřadnice, které máme přesně zaměřené. Dále je nutné zajistit nepřetržitou on-line komunikaci mezi

stacionární GPS a přijímačem GPS pohybujícího se v terénu. K tomu můžeme použít například bezdrátové WiFi spojení, či radio vysílače se sériovým protokolem. Tímto je také omezena oblast použití vlastní DGPS, tedy dosahem spojení mezi stacionární GPS a pohybující se GPS.

Na určení polohy v systému GPS, se největší chybou podílí především ionosférická refrakce. Jde o zpoždění signálu při průchodu ionosférou, kdy dochází k lomu signálu GPS a k prodloužení jeho trajektorie (obr.9). Úlohou stacionární, pevně umístěné GPS, je tedy měření odchylky mezi skutečnou polohou přijímače a polohou získanou aktuálním měřením z tohoto místa. Rozdíl naměřených hodnot pak představuje informaci o korekci pro přijímač GPS v terénu, která jsou k němu přes bezdrátové připojení neprodleně odesílána. Z tohoto pohledu je zřejmé, že využití zpřesňujících dat je také omezeno jistou oblastí, protože zpoždění signálu GPS není konstantní. Tato oblast je ovšem mnohem větší, než oblast dosahu komunikace mezi stacionární a pohybující se GPS.

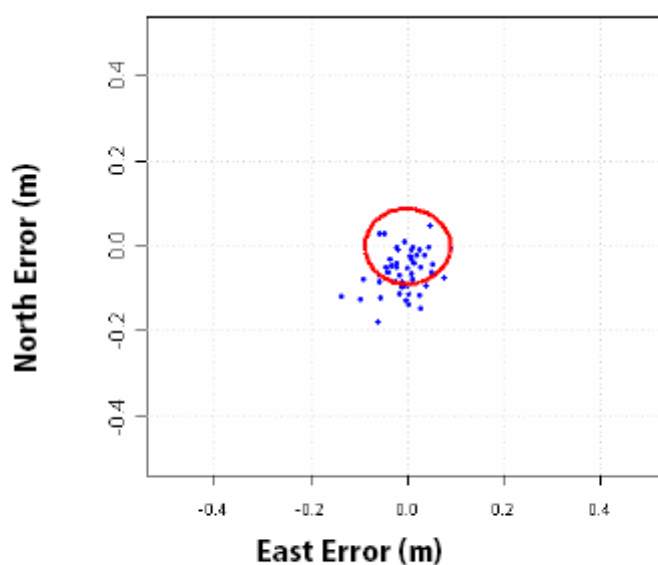
Tímto způsobem lze dosáhnout velmi výrazného zvýšení přesnosti polohy, a na prostoru daným dosahem vzájemného bezdrátového spojení, je tato metoda zpřesnění navigace mobilního robota velmi výhodná.



Obr.9: Mapa aktuálního stavu ionosféry [9]

5.2 SYSTÉM H-STAR

Technologie H-Star [7] je kombinace hardwarového a softwarového řešení, kdy se pro diferenční zpřesnění využívají data ze tří dvoufrekvenčních stanic. Při výpočtu jsou využity obě složky signálu GPS, jak kódová tak fázová data. Výsledná přesnost určení polohy je 30 centimetrů, při použití externí GPS antény až 20 centimetrů. Pro modelování stavu ionosféry a výpočet ionosférického zpoždění se využívá právě fázových dat. Technologie H-Star je například použita v GPS přijímači firmy Trimble, model Pathfinder ProXH.



GPS Pathfinder ProXH receiver with external Zephyr antenna, HRMS 10.5 cm

Obr.10: Rozptyl naměřených hodnot přístroje Trimble ProXH [7]

5.3 KALMANŮV FILTR

Kalmanův filtr je speciální matematický algoritmus pro filtraci signálů v časové oblasti [10][14]. Jde o rekurzivní prediktivní filtr, který odhaduje stav dynamického systému na základě stavu předchozího. Nejlepších výsledků filtrace signálu dosahuje, pokud je užitečný signál zarušen bílým šumem.

Algoritmus Kalmanova filtru se skládá ze dvou částí

1. predikce
2. korekce

V prvním kroku je predikován budoucí stav a odhad chyby na základě dynamického modelu uvnitř filtru. Následně se provede měření nového stavu, v našem případě souřadnic mobilního robota. Vypočítá se Kalmanův zisk, který udává jak moc našemu výpočtu věříme. Pak se provede korekce odhadu stavu (polohy robota) a korekce odhadu chyby měření. Hledáme optimální odhad, který minimalizuje střední kvadratickou chybu. Tyto dva kroky, predikce a korekce se neustále opakují. Pro výpočet následujícího stavu se použije stav předchozí, který je po následujícím výpočtu zapomenut.

Lineární stochastický systém můžeme popsat jako

$$\begin{aligned}x(t+1) &= Fx(t) + Gu(t) + v(t) \\ y(t) &= Hx(t) + e(t),\end{aligned}$$

kde F je matice systému, G vstupní distribuční matice, H matice měření, $x(t)$ je stavová veličina, $u(t)$ řídící veličina, $y(t)$ výstupní veličina, $v(t)$ a $e(t)$ jsou nekorelované diskrétní bílé šумы s kovariační maticí

$$E\left\{\begin{bmatrix} v(k) \\ e(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(k) \\ e(k) \end{bmatrix}^T\right\} = \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}$$

Smyslem použití Kalmanova filtru v navigaci mobilního robota, je získání přesnější polohy mobilního robota na základě vstupu stochastické veličiny souřadnic z GPS a vstupu souřadnic získaných z odometrie robota. Využití základního Kalmanova filtru předpokládá lineární dynamiku systému. Dynamika mobilního robota však lineární není, a proto je třeba použít rozšířený Kalmanův filtr (Extended Kalman Filter).

Základní myšlenkou rozšířeného Kalmanova filtru je lokální aproximace linearizovaného modelu systému v okolí vhodně zvoleného bodu.

Pro nelineární diskrétní systém bude platit

$$\begin{aligned}x(k+1) &= F(x(k), u(k), v(k)) \\ y(k) &= H(x(k), u(k), e(k))\end{aligned}$$

kde aktuální stav $x(k+1)$ je funkcí předchozího stavu $x(k)$ a řídicí signálu $u(k)$. $y(k)$ je vstupní veličina. $v(k)$ a $e(k)$ jsou nezávislé bílé diskrétní šumy s nulovou střední hodnotou.

Algoritmus výpočtu rozšířeného Kalmanova filtru

Predikce:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Gx(k) \\ P(k+1) &= GP(k)G^T + Q\end{aligned}$$

Korekce:

$$\begin{aligned}K &= P(k-1)H^T [HP(k-1) + Q]^{-1} \\ x(k) &= x(k-1) + K[y(k) - Hx(k-1)] \\ P(k) &= [I - KH]P(k-1)\end{aligned}$$

6. POLOHA MOBILNÍHO ROBOTA

Předpokladem úspěšného řízení mobilního robota po předem definované dráze, je dostatek kvalitních vstupních informací z čidel. Pro autonomní systém jsou základními informacemi data z odometrie. Odometrie zpracovává signál z osazených enkodérů, na jejichž výstupu jsou dva základní údaje o pohybu. Je to změna pozice (posunutí) a orientace (úhel natočení φ).

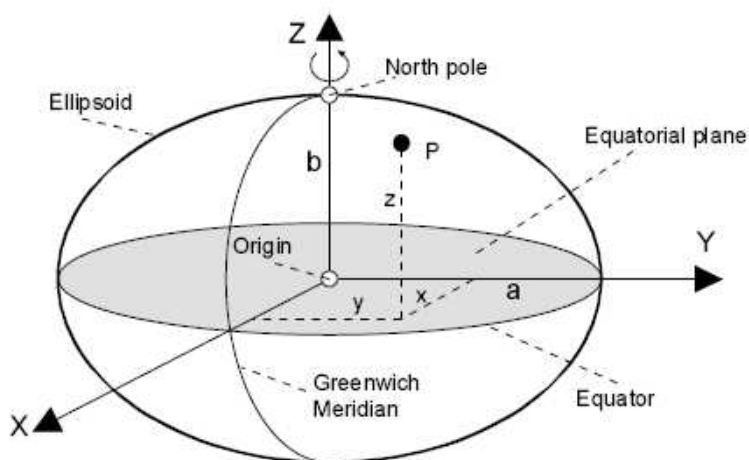
V této práci jsem bohužel nemohl použít informací z enkodérů mobilního robota, jelikož nebyla tato problematika zpracována. Proto se ukázka funkce Kalmanova filtru omezí jen na několik bodů.

6.1 URČENÍ POLOHY NA ZEMĚKOULI

Nejdůležitějšími informacemi ze systému GPS, které nám umožňují popsat polohu a pohyb tělesa v prostoru, jsou údaje o zeměpisné šířce, zeměpisné délce, azimutu pohybu, rychlosti pohybu, čase a nadmořské výšce. Pro popis pohybu mobilního robota, je dobré transformovat údaje o zeměpisné šířce a délce udávané v úhlových souřadnicích elipsoidu do kartézského systému souřadnic x, y, z systému ECEF (obr.11).

Tvar Země je charakterizován jako geoid, který však není vhodný pro matematický popis. V praxi se používá elipsoidu, který popisuje kartografický referenční systém WGS84 používaným navigačním systémem GPS.

Pro přepočítání dat z úhlových souřadnic elipsoidu do kartézského systému ECEF použijeme vztahy podle [11].

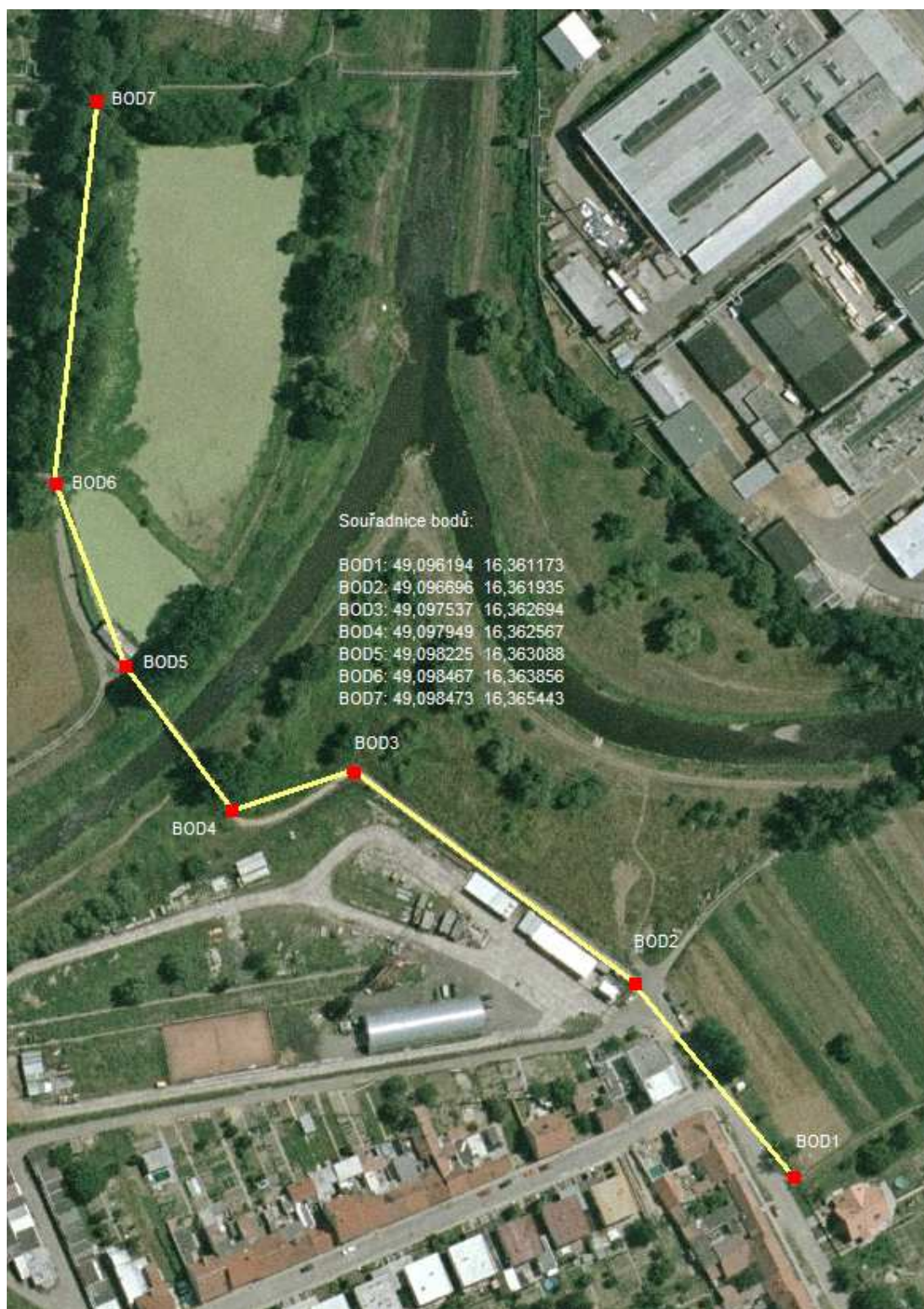


Obr.11: Kartézský souřadnicový systém ECEF [5]

6.2 BODY V SOUŘADNÉM SYSTÉMU ECEF

Pro potřebu měření polohy v terénu, bylo nutné získat přesně zaměřené body na zemském povrchu, které bych mohl jednoznačně identifikovat. Tyto body jsem získal z databáze bodů JTSK zeměměřičské kanceláře firmy ZK-Brno s.r.o. Získané údaje jsem přepočítal do kartézského souřadného systému ECEF. Neprovedl jsem žádnou další úpravu těchto dat, jsou tedy formátu a velikosti popisující obecně celou zeměkoulí.

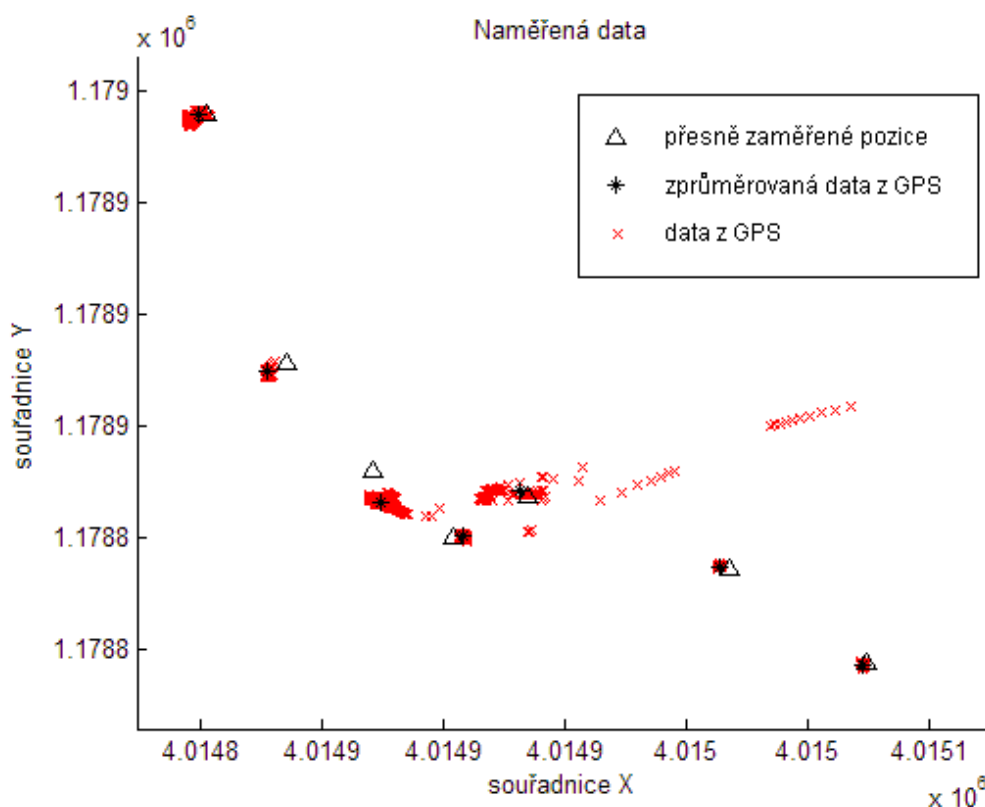
Grafický výstup na (obr.12) je zpracován v programu u-center 5.01 firmy U-blox [5]. Do programu byla naimportována mapa oblasti, na které se nachází získané přesné body. Mapu bylo třeba zkalibrovat, aby odpovídala obecným souřadnicím. Do mapy jsem poté zakreslil jednotlivé body a propojil úsečkami. Získáváme tím názorné zobrazení bodů v reálném terénu.



Obr.12: Zobrazení zaměřených bodů na fotomapě v programu u-center

6.3 MĚŘENÍ V BODECH POMOCÍ PŘIJÍMAČE GPS

V přesně zaměřených bodech jsem provedl záznam souřadnic ve stacionární poloze. K záznamu jsem použil opět program u-center 5.01 firmy U-Blox, který umožňuje export dat do formátu Google Earth KML [12]. Součástí algoritmu rozšířeného Kalmanova filtru v prostředí MATLAB [13], je možnost načtení souřadnic tohoto formátu. Pro každý bod jsem takto získal přibližně 300 vzorků.

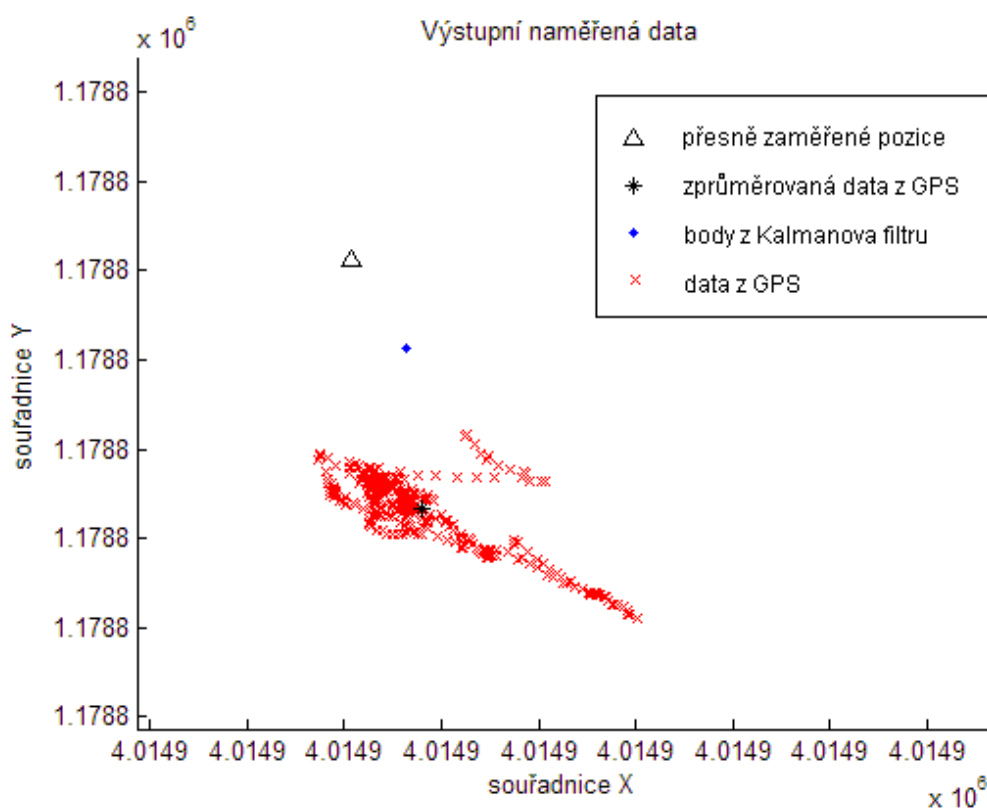


Obr.13: Zobrazení naměřených dat v programu MATLAB

Pomocí programu MATLAB jsem vykreslil všechny získané údaje o poloze jednotlivých vstupních bodů (obr.13). Červené plochy zobrazují naměřené údaje o poloze přijímače GPS v terénu, průměrnou hodnotu polohy reprezentuje „hvězdička“ a přesně zaměřené body „trojúhelník“.

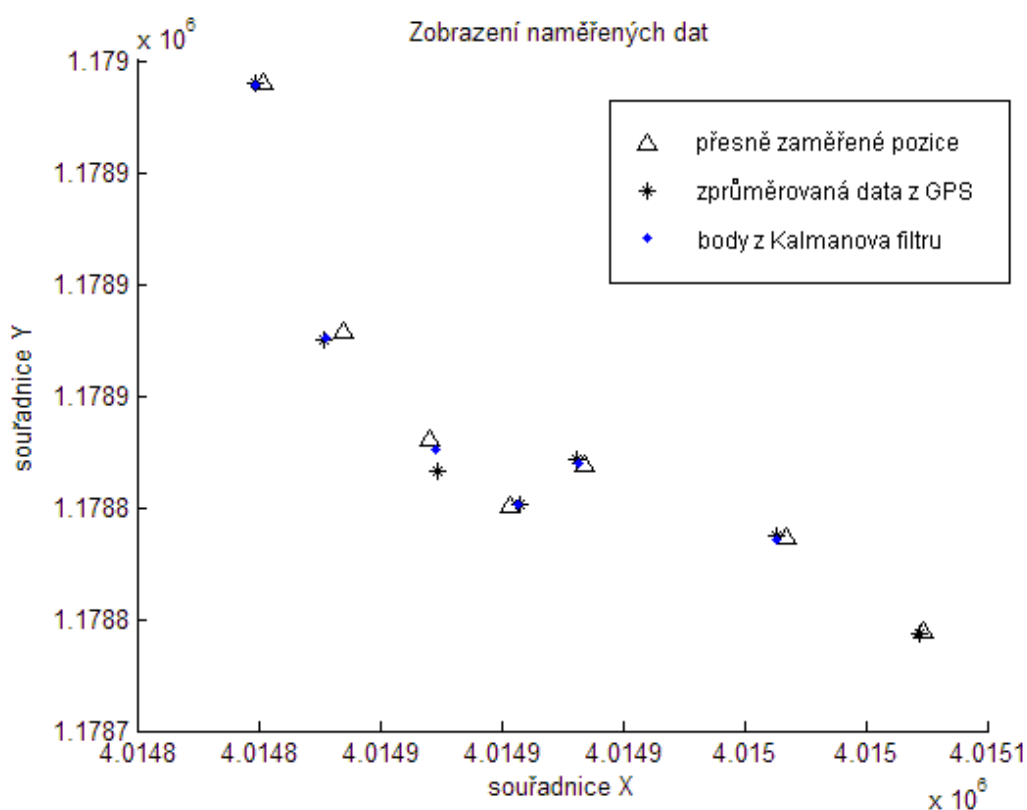
6.4 VÝSTUPNÍ DATA Z KALMANOVA FILTRU

V době psaní bakalářské práce nebyly k dispozici data z odometrie mobilního robota, které by lépe demonstrovaly funkci rozšířeného Kalmanova filtru. Jako přesných souřadnic jsem použil sedm zaměřených bodů. Vstupem stochastické veličiny ve formě zprůměrovaných naměřených souřadnic jsou souřadnice z přijímače GPS. Výsledek zpracovaných dat je vidět na detailu bodu 5 (obr.14). Rozptýlené červené pole měření GPS popisuje černý bod uprostřed pole, který je průměrem měřených GPS dat. Modrý bod je výstupem Kalmanova filtru. Ze vzájemné polohy všech tří bodů lze usoudit, že vypočtená přesnější pozice je úspěšným výstupem z Kalmanova filtru. Vypočtený bod se nachází mezi oběma měřeními a blíže k správné pozici.

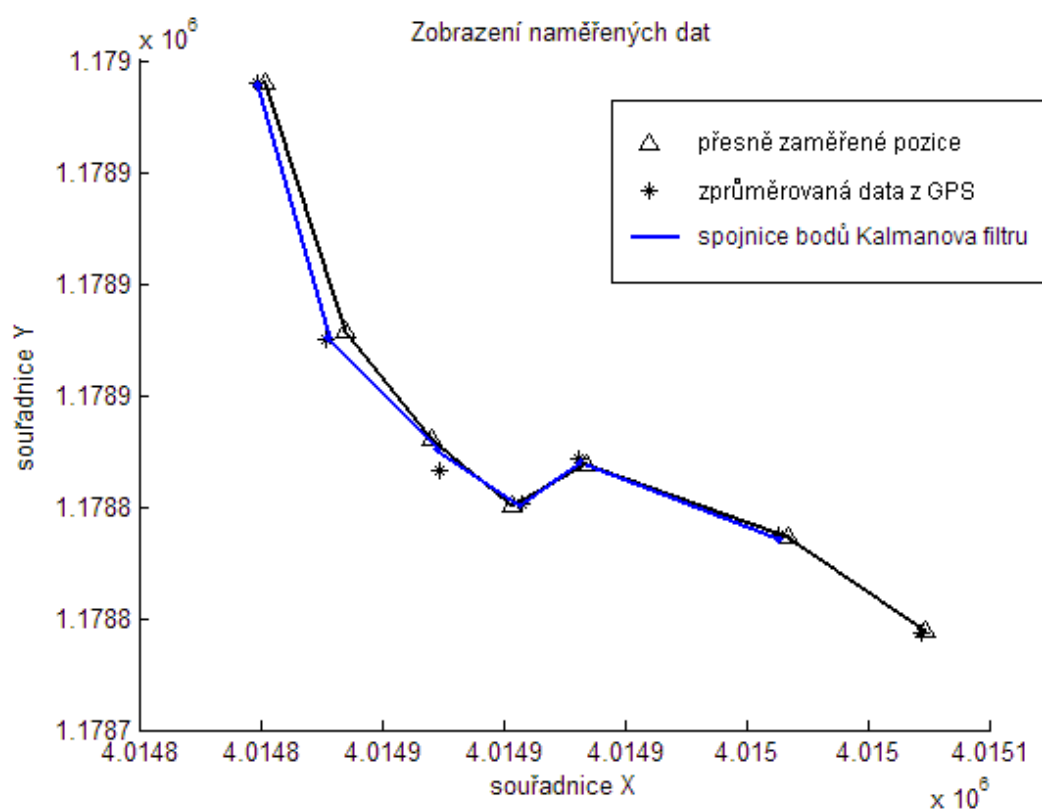


Obr.14: Detail rozptylu GPS, průměrné hodnoty, přesné pozice a výstupu Kalmanova filtru

Zobrazení všech sedmi bodů v souřadném systému ECEF (obr.15), ukazuje celkové výsledky zpracování dat Kalmanovým filtrem. Jednotlivé body jsou spojeny úsečkami (obr.16), které názorně graficky prezentují odchylky mezi známou a stochastickou veličinou. Je zřejmé, že algoritmus rozšířeného Kalmanova filtru nemůže dosahovat stoprocentních výsledků. Dalším zlepšením odhadu by bylo použití adaptivního Kalmanova filtru, což je ale nad rámec této bakalářské práce.



Obr.15:Vzájemná poloha bodů



Obr.16:Odchylky trajektorií

7. ZÁVĚR

Zvládnutí problematiky řízení mobilních robotů je velmi náročné a tato bakalářská práce se věnuje pouze jedné malé části oboru senzorů, kterou je využití navigačního systému GPS. Aby využití vstupních dat systému GPS bylo smysluplné, je nutné zajistit velkou přesnost měření a znát chybu, které jsme se při měření dopustili.

Nejdříve jsem se soustředil na výběr vhodného typu GPS přijímače a volbu výkonného a zároveň úsporného mikrokontroléru pro hlavní řídicí logiku mobilního robota. Jako přijímač GPS jsem zvolil typ Garmin 18LVC, který splňuje podmínku komunikace po sériové lince a je cenově dostupný. Výhodným poměrem výkon/spotřeba, architekturou 32-bitového jádra a širokých možností periférií, se vhodným kandidátem stal mikrokontrolér ATMEL 32UC3A0512. Pro praktické odzkoušení a odladění software byl zakoupen vývojový kit ATMEL EVK1100.

Komunikace mezi GPS přijímačem a mikrokontrolérem probíhá přes sériové rozhraní RS232, které je nekomplikované a použití v naší aplikaci plně vyhovuje. Pro odladění algoritmů je použito vývojové prostředí IAR Workbench a programátor AVR JTAGICE mkII, umožňující krokování a ladění programu uvnitř mikrokontroléru.

Pro hlavní řídicí algoritmus pohybu robota jsem vytvořil proceduru, která má za úkol spolehlivou komunikaci s přijímačem GPS, zpracování přijatých NMEA vět a rozdělení do výstupních dat.

V souladu se zadáním, jsem si zvolil jako zpřesňující metodu určení pozice Kalmanův filtr, který využiji k řízení mobilního robota po zadané dráze. Tento algoritmus zatím není implementován do mikrokontroléru a výstupy uvedené v bakalářské práci pochází z prostředí MATLAB.

K navigaci mobilního robota jsem v prostředí MATLAB zpracoval rozšířený Kalmanův filtr (EKF), který je dán nelineární dynamikou pohybu mobilního robota. Výstupní data z EKF prokázaly úspěšné zpřesnění polohy i na omezené oblasti vzorků. Použití EKF ke zpracování dat z inerciálního navigačního systému INS a globálního navigačního systému GPS, je metoda s velmi dobrými výsledky, což bylo

cílem moji práce. Přesnější výstupní data z Kalmanova filtru budou dále využita hlavním řídicím algoritmem pro zdokonalení pohybu mobilního robota.

Díky neustálému vývoji v oblasti navigačních systémů, je současné a budoucí využití satelitní navigace mobilních robotů neodiskutovatelné. Přes některé nedostatky satelitní navigace, jako je např. nedostupnost signálu na stíněných místech, přináší tento systém informaci o poloze s určitou chybou, která ale neroste s časem. Už dnes lze pomocí nových systémů a metod spolehlivě určit polohu na Zemi s přesností na centimetry. Modernizace a zavedení dalších frekvencí systému GPS, dokončení systému GALILEO, propojení se systémem GLONASS, bude dalším krokem k smysluplnému využití navigace v každodenní praxi. Myslím si, že není dalekou budoucností jízda v automatickém silničním prostředí, který bude schopen bezpečně dorazit do cíle, bez zásahu lidské ruky.

8. LITERATURA

- [1] Ivo Steiner, Jiří Černý: GPS od A do Z. Vydal eNav, s.r.o., Praha 2006
- [2] <http://www.atmel.com> – výrobce integrovaných obvodů, jednočipy, paměti
- [3] <http://www.iar.com> – vývojová prostředí C/C++ pro mikrokontroléry
- [4] <http://www.garmin.com> – výrobce přijímačů GPS
- [5] <http://www.u-blox.com> – software U-Blox u-center 5.0
- [6] <http://www.freertos.org> – real-time operační systém
- [7] <http://www.trimble.com> - přístroje GPS
- [8] <http://czepos.cuzk.cz> - síť pozemních DGPS
- [9] <http://www.nasa.gov> - Národní úřad pro letectví a vesmír
- [10] <http://robotika.cz/guide/filtering/cs> - vše o robotice
- [11] http://www.satsleuth.com/GPS_ECEF_Datum_transformation.htm - ECEF
- [12] <http://earth.google.com/> - mapy Google
- [13] <http://www.mathworks.com/> - prostředí MATLAB
- [14] S.S.Ge, F.L. Lewis: Autonomous Mobile Robots, 2006

